



DEUTSCHES  
PATENTAMT

21 Aktenzeichen: P 43 24 983.3-51  
22 Anmeldetag: 26. 7. 93  
43 Offenlegungstag: 2. 2. 95  
46 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 11. 7. 96

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V., 80636 München, DE

74 Vertreter:

Rackette, K., Dipl.-Phys. Dr.-Ing., Pat.-Anw., 79098  
Freiburg

72 Erfinder:

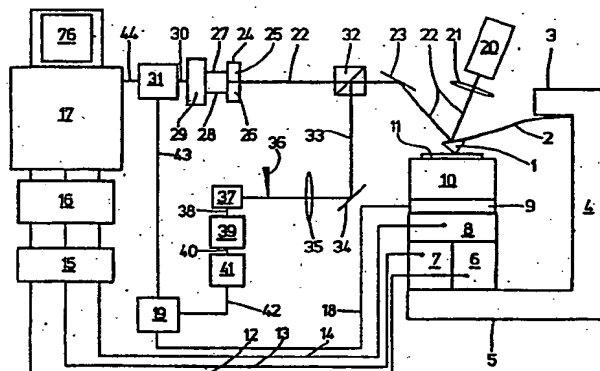
Arnold, Walter, Prof. Dr., 66119 Saarbrücken, DE;  
Rabe, Ute, 66111 Saarbrücken, DE

66 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:

WO 89 12 805

64 Akustisches Mikroskop

- 57 Akustisches Mikroskop zum Untersuchen einer Probe (11) mit einer an einem Federbalken (2) angebrachten, im oberflächennahen Bereich einer Oberfläche der Probe (11) angeordneten Meßspitze (1), mit einem Ultraschallwandler, mit einer Bewegungsvorrichtung (6, 7, 8) zum Positionieren der Probe (11) bezüglich der Meßspitze (1), und mit einer Regel- und Meßdatenerfassungsvorrichtung (17), wobei
- a) der Ultraschallwandler ein von der Meßspitze (1) beabstandeter Sendekopf (9) ist, mit dem Ultraschall in die Probe (11) eingekoppelt ist,
- b) der Ultraschall eine Frequenz aufweist, die wenigstens eine Größenordnung höher als die Resonanzfrequenz des Federbalkens (2) mit der daran angebrachten Meßspitze (1) ist,
- c) der Federbalken (2) und die Bewegungsvorrichtung (6, 7, 8) mit dem Sendekopf (9) und der Probe (11) über eine Haltevorrichtung (4), die eine gegenüber der Frequenz des Ultraschalls niedrigere Resonanzfrequenz aufweist, mechanisch steif miteinander verbunden sind und
- d) eine den Federbalken (2) mit der Meßspitze (1) aufweisende Detektionsvorrichtung (1, 2, 36, 37, 39, 41; 1, 2, 24, 58; 1, 2, 77, 85 bis 87) vorgesehen ist, die die bezüglich der Frequenz des Ultraschalls niederfrequenten topographiebedingten Auslenkungen der Meßspitze (1) über ein erstes Detektionssignal und die durch den in die Probe (11) eingekoppelten Ultraschall hervorgerufenen hochfrequenten Auslenkungen der Meßspitze (1) über ein zweites Detektionssignal erfaßt, wobei das erste Detektionssignal einem Regelkreis (2, 8, 17, 24, 29; 2, 8, 17, 77, 85, 86) einspeisbar ist, mit dem der Abstand zwischen der Meßspitze (1) und der Oberfläche der Probe (11) bei einer bezüglich der Frequenz des Ultraschalls niederfrequenten Positionierate der Meßspitze (1) über die ultraschallinduzierten hochfrequenten Auslenkungen der Meßspitze (1) zeitlich gemittelt konstant haltbar ist.



## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein akustisches Mikroskop zum Untersuchen einer Probe.

Aus der WO 89/12805 ist ein akustisches Mikroskop bekannt, bei dem eine an einer Stimmgabel angebrachte Meßspitze im oberflächennahen Bereich einer Oberfläche einer Probe angeordnet ist. Die Stimmgabel aus piezoelektrischem Quarz ist über an ihren Schenkeln angebrachte Elektroden mit einer angelegten elektrischen Wechselspannung zu mechanischen Schwingungen anregbar. Diese mechanischen Schwingungen koppeln über die Meßspitze als Ultraschall in die Oberfläche ein und führen in Abhängigkeit der Wechselwirkung zwischen der schwingenden Meßspitze und der Oberfläche der Probe durch die Dämpfung der Schwingung zu einer Verschiebung der Schwingungsfrequenz und/oder der Amplitude der Stimmgabel gegenüber einer freien Schwingung. Mit einer Bewegungsvorrichtung sind die Probe und die Meßspitze relativ zueinander positionierbar, wobei die Meßspitze zeitlich gemittelt in einem gleichbleibenden Abstand von der Oberfläche angeordnet ist. Eine Regel- und Meßdatenerfassungsvorrichtung dient dem Zuordnen der durch die Meßspitze aufgenommenen Meßwerte in Abhängigkeit der Relativposition der Meßspitze zu der Probe.

Bei diesem akustischen Mikroskop dient die Stimmgabel mit der daran angebrachten Meßspitze sowohl als Ultraschallsender als auch als Sensor. Dadurch bedingt muß zur Gewinnung der Meßwerte eine elektronisch durchzuführende Subtraktion von im wesentlichen gleich großen Werten für die Frequenz und die Amplitude der mechanischen Schwingung durchgeführt werden, die verhältnismäßig fehlerträchtig ist. Dies hat insbesondere bei kurzen Meßzeiten pro Meßpunkt auf der Oberfläche ein nachteilig schlechtes Signal/Rauschverhältnis zur Folge. Durch die resonante Anregung der Stimmgabel im Dauerbetrieb ist eine Detektion der Topographie der Oberfläche getrennt von einem Erfassen von beispielsweise elastischen Eigenschaften im Kopplungsbereich zwischen der Meßspitze und der Oberfläche prinzipiell nicht durchführbar. Weiterhin ist bei diesem akustischen Mikroskop vorgesehen, die Stimmgabel vorzugsweise bei ihrer Resonanzfrequenz im Bereich von etwa 32 Kilohertz anzuregen, so daß zwar die Amplitude im Verhältnis zu der anregenden Kraft groß ist, jedoch einkoppelnde störende Schwingungen in diesem Frequenzbereich ebenfalls zu das Signal/Rauschverhältnis nachteilig beeinflussenden verhältnismäßig hohen Störampplituden führt.

Ein weiteres akustisches Mikroskop ist aus der Publikation "Scanning Microdeformation Microscopy" von B. Cretin und F. Sthal in der Zeitschrift "Applied Physics Letters" 62, Seiten 829 bis 831 (1993) bekannt. Bei dieser Vorrichtung werden durch Schwingungen der Meßspitze mit etwa 50 Kilohertz bei der Resonanzfrequenz des Federbalkens auf der Probenoberfläche Mikrodeformationen erzeugt, welche in der Probe eine akustische Welle induzieren. Die akustische Welle ist mit einem Ultraschallwandler in Amplitude und Phase bezüglich der Schwingungen der Meßspitze detektierbar. Durch Abtragen der Amplitude und/oder der Phase der Ultraschallwelle ist in Abhängigkeit von der Position der Meßspitze ein Bild der elastischen Eigenschaften der von der Meßspitze abgetasteten Probenoberfläche erzeugbar. Es ist auch möglich, unter der Oberfläche befindliche Materialinhomogenitäten zu detektieren und abzubilden. Die Ortsauflösung dieses Mikroskopes liegt

bei etwa 10 Mikrometern.

Mit einem derartigen akustischen Mikroskop ist es möglich, mechanisch harte und weiche Bereiche der Probenoberfläche zu detektieren. Die Topographie der Probenoberfläche ist jedoch nur indirekt durch Auswertung der empfangenen Ultraschallsignale möglich und erweist sich insbesondere bei verhältnismäßig komplizierten Halbleitertopographien als sehr schwierig. Da moderne Halbleiterstrukturen im Größenbereich von wenigen Mikrometern liegen, ist eine Verwendung dieses Mikroskopes für hochaufgelöste Untersuchungen an derartigen Proben nicht möglich.

Ein weiterer Nachteil dieses akustischen Mikroskopes ist das verhältnismäßig kleine Signal/Rauschverhältnis. Die schwingende Meßspitze wirkt als Punktquelle, so daß die Amplitude der Ultraschallwelle nach Durchlaufen der Probe zusätzlich zu der Dämpfung in dem Ausbreitungsmedium durch die Kugelwellencharakteristik des ausgesandten Ultraschalles an dem Detektionsort sehr gering ist. Aus diesem Grund ist vorgesehen, das durch den Ultraschallwandler detektierte Signal mit einem Lock-in-Verstärker zu verstärken, um das Signal/Rauschverhältnis zu verbessern. Dies hat jedoch eine verhältnismäßig lange Meßzeit zur Folge.

In der Publikation "Using Force Modulation to Image Surface Elasticities with the Atomic Force Microscope" von P. Maivald, H.J. Butt, S.A.C. Gould et al. in der Zeitschrift "Nanotechnology" 2, Seiten 103 folgende (1991) ist ein atomares Kraftmikroskop beschrieben, welches es gestattet, neben der unmittelbaren Messung der Topographie einer Probe bei Konstanthalten der mittleren Kraft auf den Federbalken über ein Verstell-element durch zyklisches Zu- und Wegbewegen der Probe in Bezug auf die Meßspitze ortsabhängig die Elastizitätseigenschaften im Bereich der Probenoberfläche zu messen. In mechanisch weichen Bereichen ist die Auslenkung des Federbalkens größer als in mechanisch härteren Bereichen. Somit ist durch Auftragen der Maximalauslenkungen der Meßspitze bei gleichbleibender aufgeprägter Kraft in Abhängigkeit von der Position der Meßspitze ein Bild der Topographie sowie der Elastizitätseigenschaften im oberflächennahen Bereich erzeugbar.

Bei einem derartigen atomaren Kraftmikroskop ist es schwierig, die von der Elastizität und die von der Topographie stammenden Anteile in dem Kontrast zu trennen. Die Modulationsfrequenz zum Hin- und Wegbewegen der Probe liegt im Bereich von wenigen Kilohertz, damit die Phasenverschiebung zwischen Anregung und Auslenkung möglichst geringgehalten ist. Bei dem beschriebenen Kraftmikroskop beträgt die Wiederholungsrate 5 Kilohertz und dadurch ergibt sich neben der Gefahr einer Überlagerung durch Schwingungen des mechanischen Aufbaues des akustischen Mikroskopes eine verhältnismäßig lange Meßzeit für die Elastizitätsmessung.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein akustisches Mikroskop zu schaffen, das es gestattet, sowohl die Topographie als auch die Elastizität der Probe mit einer hohen Ortsauflösung und einem hohen Signal/Rauschverhältnis sowie einem hohen Kontrast schnell und unabhängig voneinander zu messen.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein akustisches Mikroskop zum Untersuchen einer Probe mit einer an einem Federbalken angebrachten, im oberflächennahen Bereich einer Oberfläche der Probe angeordneten Meßspitze, mit einem Ultraschallwandler, mit einer Bewegungsvorrichtung zum Positionieren der

Probe bezüglich der Meßspitze, und mit einer Regel- und Meßdatenerfassungsvorrichtung, wobei der Ultraschallwandler ein von der Meßspitze beabstandeter Sendekopf ist, mit dem Ultraschall in die Probe einkoppelbar ist, der Ultraschall eine Frequenz aufweist, die wenigstens eine Größenordnung höher als die Resonanzfrequenz des Federbalkens mit der daran angebrachten Meßspitze ist, der Federbalken und die Bewegungsvorrichtung mit dem Sendekopf und der Probe über eine Haltevorrichtung, die eine gegenüber der Frequenz des Ultraschalls niedrigere Resonanzfrequenz aufweist, mechanisch steif miteinander verbunden sind und eine den Federbalken mit der Meßspitze aufweisende Detektionsvorrichtung vorgesehen ist, die die bezüglich der Frequenz des Ultraschalls niederfrequenteren topographiebedingten Auslenkungen der Meßspitze über ein erstes Detektionssignal und die durch den in die Probe eingekoppelten Ultraschall hervorgerufenen hochfrequenten Auslenkungen der Meßspitze über ein zweites Detektionssignal erfaßt, wobei das erste Detektionssignal einem Regelkreis einspeisbar ist, mit dem der Abstand zwischen der Meßspitze und der Oberfläche der Probe bei einer bezüglich der Frequenz des Ultraschalls niederfrequenteren Positionierate der Meßspitze über die ultraschallinduzierten hochfrequenten Auslenkungen der Meßspitze zeitlich gemittelt konstant haltbar ist.

Die Detektion der ultraschallinduzierten Auslenkungen der Meßspitze gestattet ein direktes Erfassen der Amplituden der ultraschallinduzierten Oberflächenwellen als ein Meßsignal für die Elastizitätsmessung. Durch das Konstanthalten eines mittleren Abstandes zwischen der Meßspitze und der Oberfläche der Probe über einen Regelkreis läßt sich mit einem zugeordneten Regelsignal unabhängig von den ultraschallinduzierten Auslenkungen der Meßspitze ein Bild der Topographie der Oberfläche erzeugen. Durch die mechanisch steife Verbindung der Bauelemente und das Vorsehen einer gegenüber der Resonanzfrequenz des Federbalkens mit der daran angebrachten Meßspitze erheblich höheren Ultraschallfrequenz ist aufgrund der Entkopplung der topographiebedingten Auslenkungen und ultraschallinduzierten Auslenkungen ein hohes Signal/Rauschverhältnis und ein hoher Kontrast bei der Auswertung der beiden Detektionssignale erreicht.

Vorteilhafterweise enthält der Regelkreis zum Konstanthalten der mittleren Ablenkung der Meßspitze einen Piezokristall und eine erste Detektionseinheit der Detektionsvorrichtung mit einer langsamen Ansprechzeit. Es ist aber auch möglich, ein Regelsignal über eine niederfrequente Filterung aus einem Signal aus einer einzigen breitbandigen Detektoreinheit zu gewinnen, welches auch das hochfrequente, ultraschallinduzierte Signal enthält.

Vorzugsweise findet Ultraschall mit einer Frequenz von wenigstens einigen Megahertz Verwendung, so daß niederfrequente Störungen im Bereich der Resonanzfrequenz des Federbalkens mit der daran angebrachten Meßspitze in einfacher Weise abtrennbar sind. Durch die Messung der Auslenkungen der Meßspitze weit oberhalb der Eigenfrequenz des Federbalkens mit der daran angebrachten Meßspitze sind niederfrequente Störungen wie beispielsweise mechanische Schwingungen in dem Aufbau ohne nachteiligen Einfluß.

In einem Ausführungsbeispiel der Erfindung erfolgt die Erfassung der Auslenkungen der Meßspitze über eine Ablenkung eines an dem Federbalken reflektierten Lichtstrahles. Der Regelkreis ist an eine optische Detek-

tionseinheit mit einer zweifach segmentierten Photodiode angeschlossen, die so angeordnet ist, daß bei einer bestimmten Wechselwirkungskraft zwischen der Meßspitze und der Oberfläche der Probe der Lichtstrahl mittig zwischen die beiden Segmente der Photodiode fällt. Die Bandbreite der zweifach segmentierten Photodiode ist wesentlich kleiner als die Frequenz des eingekoppelten Ultraschalles, so daß die hochfrequenten Auslenkungen der Meßspitze mit der ersten Detektionseinheit nicht erfaßbar sind.

Die Detektionsvorrichtung weist eine zweite optische Detektionseinheit auf, die in diesem Ausführungsbeispiel durch eine Einzelphotodiode mit einer Bandbreite von wenigstens der Ultraschallfrequenz und eine glattkantige Abschattungsvorrichtung, beispielsweise eine Rasierklinge, gebildet ist, welche zueinander so einjustiert sind, daß bei konstantgehaltener mittlerer Wechselwirkungskraft zwischen der Meßspitze und der Probenoberfläche ohne eingekoppelten Ultraschall die Abschattungsvorrichtung im wesentlichen die Hälfte des Lichtstrahles blockiert.

In einem weiteren Ausführungsbeispiel besteht die zweite optische Detektionseinheit aus einem Heterodyne-Laufzeit-Interferometer, bei dem in dem langen Interferometerarm mittels einer Frequenzverschiebevorrichtung die Frequenz des Lichtes in diesem Arm um einen vorbestimmten Betrag verschiebbar ist und die beiden überlagerten Ausgangsstrahlen auf jeweils eine Photodiode auftreffen. Mit einem Differenzdemodulationsverstärker ist das verstärkte Differenzsignal der beiden Photodioden bildbar, das anschließend durch Demodulation von der Verschiebefrequenz ein der Auslenkung der Meßspitze und damit des Federbalkens entsprechendes Ausgangssignal enthält.

In einer anderen Ausführungsform der Erfindung ist der Regelkreis und die Detektionsvorrichtung in einem kapazitiven Detektor integriert, bei dem die Meßkapazität aus dem Federbalken und einer gegenüberliegend angeordneten nadelförmigen Gegenelektrode gebildet ist. Die hochfrequenten Änderungen der Meßkapazität sind durch einen Hochpaß von dem als Regelsignal verwendeten, über einen Tiefpaß abgetrennten Teil der Meßkapazitätsänderungen abtrennbar. Dadurch läßt sich der mitunter justierempfindliche optische Aufbau umgehen.

Weitere Ausführungsformen und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen und der nachfolgenden Figurenbeschreibung. Es zeigen:

Fig. 1 in einer schematischen Darstellung ein akustisches Mikroskop mit einer Detektionsvorrichtung und einem Regelkreis mit zwei optischen Detektionseinheiten zum Erfassen der Topographie und der ultraschallinduzierten Auslenkungen der Meßspitze,

Fig. 2 das Blockschaltbild einer Sende- und Empfangseinheit zum Hervorrufen und Aufnehmen der Auslenkungen der Meßspitze,

Fig. 3 ein akustisches Mikroskop in schematischer Darstellung mit einem Heterodyne-Laufzeit-Interferometer als zweiter optischer Detektionseinheit zum Erfassen der ultraschallinduzierten Auslenkungen der Meßspitze und

Fig. 4 ein akustisches Mikroskop in einer schematischen Darstellung, bei dem zum Erfassen der ultraschallinduzierten Auslenkungen des Federbalkens eine kapazitive Detektionsvorrichtung Verwendung findet.

In Fig. 1 ist schematisch ein akustisches Mikroskop dargestellt. Eine Meßspitze 1 ist mit ihrer Basis an einem Ende eines Federbalkens 2 aus  $\text{Si}_3\text{N}_4$  von etwa 100 Mi-

krometer Länge befestigt. In dem Ausführungsbeispiel ist die Meßspitze 1 von pyramidenartiger Form und hat in der Spitze einen Krümmungsradius von etwa 50 Nanometer. Der Federbalken 2 hat eine Federkonstante von etwa 0,1 Newton pro Meter. Der Federbalken 2 ist mit dem anderen Ende an dem oberen Ende 3 einer mechanisch steifen Haltevorrichtung 4 angebracht.

An der Basis 5 der Haltevorrichtung 4 ist ein röhrenförmiger Piezo-Kristall von etwa 1 Zentimeter Durchmesser und 1 Millimeter Wandstärke aufgebracht. Der Piezokristall weist zum Ausführen von rechtwinklig aufeinanderstehenden Bewegungen in einer Ebene um seine Außenfläche 4 Elektroden auf, die jeweils um 90 Grad versetzt jeweils ein Viertel der Mantelfläche bedecken. Die Innenwand ist mit einer an Masse angeschlossenen Elektrode beschichtet. In Fig. 1 sind zwei Elektroden 6, 7 schematisch gezeichnet. Durch Beaufschlagen der zwei sichtbaren, um 90 Grad versetzten Elektroden 6, 7 mit Steuerspannungen ist eine rechtwinklige Bewegung in einer Ebene ausführbar. Die beiden nicht sichtbaren, umfänglich aufgebrachten Elektroden sind mit der negativen Spannung der jeweils gegenüberliegenden Elektrode beschaltet. Eine der sichtbaren Elektroden 6, 7 dient zusammen mit der zugehörigen, um 180 Grad versetzten nicht sichtbaren Elektrode der Bewegung in der x-Richtung und ist im weiteren als x-Elektrode 6 bezeichnet. Die Elektrode 7 dient zusammen mit der entsprechend beschalteten gegenüberliegenden Elektrode der Bewegung in der y-Richtung, die rechtwinklig auf der x-Richtung steht, und ist im weiteren als y-Elektrode 7 bezeichnet.

Ein Ende des röhrenförmigen Piezoelementes ist mit einer ringförmigen, den gesamten Umfang umschließenden z-Elektrode 8 zum Ausführen einer senkrecht auf der Bewegungsebene der x-Elektrode 6 und y-Elektrode 7 versehen. In der Zeichnung sind der besseren Übersichtlichkeit wegen die Größenverhältnisse verzerrt wiedergegeben.

Auf der z-Elektrode 8 befindet sich ein Sendekopf 9, mit dem über einen Vorlaufkörper 10 Ultraschall in eine Probe 11 einkoppelbar ist. Die Meßspitze 1 liegt auf einer Oberfläche der Probe 11 auf. Sie kann aber auch einen Abstand von wenigen 100 Nanometer von der Oberfläche der Probe 11 aufweisen.

Die Elektroden 6, 7, 8 sind jeweils über zugehörige Piezosteuerleitungen 12, 13, 14 über einen Hochspannungsverstärker 15 und einen Digital-Analog-Wandler 16 mit einer Regel- und Meßdatenerfassungsvorrichtung 17 verbunden. Der Sendekopf 9 ist über eine Leitung 18 an eine Sende- und Empfangseinheit 19 angeschlossen, mittels der, wie weiter unten mit Bezug auf die Fig. 2 genauer beschrieben wird, die Auslenkungen der Meßspitze 1 durch den Ultraschall meßbar sind. Die Auslenkungen der Meßspitze 1 betragen in diesem Ausführungsbeispiel etwa 10 Nanometer.

Aus einer Halbleiterlaserdiode 20, die bei einer Wellenlänge von etwa 670 Nanometer emittiert, fällt ein durch eine Linse 21 fokussierter Laserstrahl 22 auf das abgeflachte, freie Ende des Federbalkens 2, an dem die Meßspitze 1 angebracht ist. Der reflektierte Teil des Laserstrahles 22 fällt auf einen Spiegel 23, der den Laserstrahl 22 durch einen Strahlteiler 32 hindurch auf eine im Vergleich zu der Frequenz des Ultraschalles langsame zweifach segmentierte Photodiode 24 lenkt.

Der Spiegel 23 und die Photodiode 24 sind so angeordnet, daß der Laserstrahl 22 bei einer bestimmten Wechselwirkungskraft zwischen der Meßspitze 1 und

der Probe 11 in der Meßposition der Meßspitze 1 mitig zwischen das erste Element 25 und das zweite Element 26 der zweifach segmentierten Photodiode 24 fällt.

Über Ausgangsleitungen 27, 28 beaufschlagen die Photospannungen des ersten Elementes 25 und zweiten Elementes 26 einen Normierungsverstärker 29, der die Differenz zwischen den Photospannungen der Elemente 25, 26 auf deren Summenwert normiert und verstärkt. Das Ausgangssignal des Normierungsverstärkers 29 beaufschlagt über eine Leitung 30 einen Eingang eines Analog-Digital-Wandlers 31, der die Spannungen digitalisiert.

Der Strahlteiler 32 teilt den von dem Spiegel 23 einfallenden Laserstrahl 22 im Verhältnis von etwa 1 : 1 auf. Der Strahlteiler 32 ist so angeordnet, daß der an ihm reflektierte Laserstrahl 33 auf einen Spiegel 34 auftrifft, der wiederum den reflektierten Laserstrahl 33 durch eine Kollimationslinse 35 an einer Rasierklinge 36 vorbei auf eine einzellige Photodiode 37 lenkt, deren Bandbreite wenigstens gleich der Frequenz des Ultraschalles ist.

Der Strahlteiler 32, der Spiegel 34, die Kollimationslinse 35 und die Rasierklinge 36 sind so angeordnet, daß bei mittlerer Ausrichtung des durch den Strahlteiler 32 durchlaufenden Teiles des Laserstrahles 22 auf die zweifach segmentierte Photodiode 24 die Rasierklinge 36 den reflektierten Laserstrahl 33 im wesentlichen mittersymmetrisch abschattet. Der nichtabgeschattete Anteil des reflektierten Laserstrahles 33 trifft auf die einzellige Photodiode 37. Die optischen Weglängen in diesem Aufbau liegen im Zentimeterbereich.

Die einzellige Photodiode 37 ist über eine Leitung 38 mit einem Lastwiderstand von 50 Ohm und einem Schutzwiderstand beschaltet, die als eine Widerstandsschaltung 39 dargestellt sind. Die einzellige Photodiode 37 ist in dieser Ausführungsform eine Silizium-Pin-Diode mit einer Anstiegszeit von etwa 1 Nanosekunde. Es sind aber auch andere lichtempfindliche Detektoren mit einer größeren Bandbreite als die Frequenz des eingekoppelten Ultraschalles wie Avalanche-Dioden verwendbar. Das Ausgangssignal der Widerstandsschaltung 39 beaufschlagt über eine Leitung 40 den Eingang eines Verstärkers 41 mit einer Verstärkung von etwa 60 Dezibel. Das Ausgangssignal des Verstärkers 41 beaufschlagt über eine Leitung 42 einen Spannungseingang der Sende- und Empfangseinheit 19.

Der Datenausgang der Sende- und Empfangseinheit 19 ist über eine Leitung 43 mit einem zweiten Eingang des Analog-Digital-Wandlers 31 verbunden, mit dem die Spannungen aus der Sende- und Empfangseinheit 19 digitalisierbar sind. Über eine Leitung 44 sind die von dem Analog-Digital-Wandler 31 digitalisierten Daten in die Regel- und Meßdatenerfassungsvorrichtung 17 einspeisbar. In einem Speicher der Regel- und Meßdatenerfassungsvorrichtung 17 sind in Abhängigkeit von der Position der Probe 11 die digitalisierten Ausgangssignale aus dem Normierungsverstärker 29 und der Sende- und Empfangseinheit 19 abspeicherbar. Eine Ausgabereinheit 76, zum Beispiel ein Bildschirm, ist zur Ausgabe des Inhaltes des Speichers der Regel- und Meßdatenerfassungsvorrichtung 17 in Form einer Farb- oder Grauwertkodierung vorgesehen.

Die Fig. 2 zeigt in einem Blockschaltbild den inneren Aufbau der Sende- und Empfangseinheit 19. Das in der Leitung 42 anliegende Signal des Verstärkers 41 der Fig. 1 liegt an einem Kanal 45 eines Oszilloskopes 46 und an dem Signaleingang 47 eines Zeittorintegrators 48 an.

Ein Ultraschallsender 57 sendet einen kurzen Puls mit

etwa 15 Nanosekunden Anstiegszeit über die Leitung 18 an den Sendekopf 9. Gleichzeitig erhält ein Impulsgenerator 49 über eine Leitung 56 einen Startpuls. Der Impulsgenerator 49 gibt daraufhin über eine Leitung 51 einen Rechteckimpuls einstellbarer Zeitdauer auf eine Verzögerungsschaltung 52, mit der der Rechteckimpuls einstellbar gegenüber dem Startpuls verzögerbar ist. Über eine Leitung 53 ist der verzögerte Rechteckimpuls einerseits in einen zweiten Kanal 54 des Oszilloskopes 46 und andererseits auf den Zeittoreingang 55 des Zeittorintegrators 48 einspeisbar. Die Zeitablenkung des Oszilloskopes 46 ist über eine Leitung 75 von dem Impulsgenerator 49 ausgelöst. Mit Hilfe des Oszilloskopes 46 ist die Lage des verzögerten Rechteckimpulses aus der Verzögerungsschaltung 52 bezüglich des an dem Kanal 45 anliegenden Signales kontrollierbar.

Mit dem Zeittorintegrator 48 ist während des an dem Zeittoreingang 55 anliegenden hohen Pegels des zeitverzögerten Rechteckimpulses aus dem Impulsgenerator 49 die an dem Signaleingang 47 anliegende mittlere Amplitude bestimmbar. Der mittlere Amplitudenwert ist über die Leitung 43 in den Analog-Digital-Wandler 31 der Fig. 1 zur Digitalisierung einspeisbar.

Die Wiederholrate des Ultraschallsenders 57 ist so groß, daß der Ultraschallamplitudenwert in jeder Position der Probe 11 wenigstens einmal aktualisiert ist, bevor die Regel- und Meßdatenerfassungseinrichtung 17 einen neuen Amplitudenwert einliest. In diesem Ausführungsbeispiel beträgt die Ultraschallwiederholungsrate etwa 1 Kilohertz, so daß bis zu einer Einlesefrequenz von etwa 500 Hertz sichergestellt ist, daß wenigstens ein Ultraschallpuls an einer Position der Probe 11 ausgesendet ist.

Wie bereits erwähnt, ist die mittlere Wechselwirkungskraft zwischen der Meßspitze 1 und der Probe 11 während der Messung konstantzuhalten. Dies ist dadurch erreichbar, daß in einem Regelkreis der durch den Strahlteiler 32 transmittierte Teil des Laserstrahles 22 über die Regel- und Meßdatenerfassungsvorrichtung 17 durch entsprechende Verstellung der z-Elektrode 8 mittig zwischen dem ersten Element 25 und zweiten Element 26 der zweifach segmentierten Photodiode 24 haltbar ist. Bei positiven oder negativen Änderungen des Ausgangspegels des Normierungsverstärkers 29 ist die Spannung in der Piezosteuerleitung 14 an der z-Elektrode 8 so nachregelbar, daß die Ausgangsspannung des Normierungsverstärkers 29 sich dem Neutralwert nähert. Die Regelspannung für die z-Elektrode 8 gibt in Abhängigkeit der x- und y-Position der Probe 11 ein Bild der Topographie der Probe 11.

Die Frequenz des Ultraschalls ist zwischen etwa 5 Megahertz und etwa 100 Megahertz einstellbar und liegt somit weit oberhalb der Resonanzfrequenz des in diesem Ausführungsbeispiel verwendeten Federbalkens 2 mit der Meßspitze 1 von einigen Kilohertz.

Bei dem eingekoppelten Ultraschall handelt es sich in diesem Ausführungsbeispiel um Longitudinalwellen, so daß die Oberfläche der Probe 11 Normalschwingungen ausführt. Diese Normalschwingungen führen zu einer hochfrequenten Auslenkung des Federbalkens 2, welche jedoch durch die zu geringe Bandbreite der langsamen zweifach segmentierte Photodiode 24 nicht erfäßbar sind, in der einzelligen Photodiode 37 mit einer Bandbreite im Megahertzbereich jedoch durch die Abschattung eines Teiles der reflektierten Laserstrahles 33 mit der Rasierklinge 36 zu einem Meßsignal führt.

In diesem Ausführungsbeispiel ist die Verzögerungsschaltung 52 so eingestellt, daß in dem Zeittorintegrator

48 die mittlere Amplitude des ersten hochfrequenten Ausschlages des Federbalkens 2 in Folge der Oberflächenschwingung der Probe 11 bestimmbar ist. Nach dem Abspeichern eines Meßwertes für die Auslenkung der Meßspitze 1 ist die Probe 11 mittels entsprechender Ausgangssignale der Regel- und Meßdatenerfassungsvorrichtung 17 auf die x-Elektrode 6 und die y-Elektrode 7 an der nächsten Meßstelle positionierbar. Anschließend erfolgt der nächste Ultraschallmeßzyklus.

Während der Abrasterung der Oberfläche der Probe 11 über den vorbestimmten Meßbereich erfolgt in der Ausgabereinheit 76 eine ortsabhängige Darstellung der Regelspannungen der z-Elektrode 8 zur Darstellung der Topographie der Oberfläche der Probe 11 sowie eine ortsabhängige Darstellung der ultraschallinduzierten Auslenkung der Meßspitze 1 über die entsprechenden Meßwerte. Diese Darstellung erfolgt vorzugsweise in einer üblichen Grau- oder Farbwertkodierung. Auf diese Weise ist gleichzeitig in meßtechnisch voneinander unabhängiger Weise sowohl ein Bild der Topographie der Oberfläche der Probe 11 sowie ein den Elastizitätseigenschaften der Probenoberfläche entsprechendes Bild der Amplituden der Ultraschallwellen an der Oberfläche der Probe 11 erzeugbar.

Zur meßtechnischen Erfassung anderer zeitlicher Bereiche des ausgesandten Ultraschalls ist es möglich, das Zeittor mittels der Verzögerungsschaltung 52 zeitlich zu verändern. Dies ist insbesondere auch dann erforderlich, wenn ein Wechsel des Vorlaufkörpers 10 mit einer Veränderung der Durchlaufzeit erfolgt ist.

In Fig. 3 ist schematisch ein weiteres Ausführungsbeispiel eines akustischen Mikroskopes dargestellt, bei dem die denen der Fig. 1 entsprechenden Bauelemente mit den gleichen Bezugszeichen versehen und im folgenden nicht weiter erläutert sind. Bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 3 ist der von dem Strahlteiler 32 reflektierte Laserstrahl 33 in ein Heterodyne-Laufzeit-Interferometer 58 eingekoppelt. Der reflektierte Laserstrahl 33 trifft auf einen Eingangsstrahlteiler 59, der die auftreffende Intensität etwa zur Hälfte in den langen Arm 60 des Heterodyne-Laufzeit-Interferometers 58 einkoppelt.

In dem langen Arm 60 befinden sich zwei Spiegel 61, 62, welche das Licht in dem langen Arm 60 durch eine auf der Grundlage des akusto-optischen Effektes arbeitenden Bragg-Zelle 63 hindurch auf einen Ausgangsstrahlteiler 64 lenken. Die Spiegel 61, 62 sowie die Bragg-Zelle 63 sind so angeordnet, daß das in die erste Ordnung gebrochene, frequenzverschobene Ausgangslicht der Bragg-Zelle 63 auf den Ausgangsstrahlteiler 64 fällt. Die Bragg-Zelle 63 ist über eine Leitung 65 mit einer Ansteuerschaltung 66 verbunden, mittels der der Betrag der Frequenzverschiebung in diesem Ausführungsbeispiel auf etwa 80 Megahertz eingestellt ist.

Der kurze Arm 67 des Heterodyne-Laufzeit-Interferometers 58 ist durch den durch den Eingangsstrahlteiler 59 transmittierten Anteil von etwa der halben Intensität des Laserstrahles 33 gebildet. Die Lichtbündel des langen Armes 60 und des kurzen Armes 67 sind über den Ausgangsstrahlteiler 64 kollinear in den Interferenzstrahlen 68, 69 überlagert.

Der erste Interferenzstrahl 68 trifft auf eine erste Interferenzphotodiode 70, deren Ausgangssignal über eine Leitung 71 einen ersten Eingang eines Differenzdemodulationsverstärkers 72 beaufschlagt. Der zweite Interferenzstrahl 69 trifft auf eine zweite Interferenzphotodiode 73, deren Ausgangssignal über eine Leitung 74 einen zweiten Eingang des Differenzdemodulationsver-

stärkers 72 beaufschlagt.

In den Ausgangssignalen der Interferenzphotodiode 70, 73 sind in bekannter Weise durch die Laufzeitdifferenz des Lichtes zwischen dem kurzen Arm 67 und dem langen Arm 60 Phasenmodulationen enthalten, die den Auslenkungsdifferenzen der Meßspitze 1 proportional sind. Der Wegunterschied zwischen den Armen 60, 67 ist vorzugsweise so gewählt, daß die Empfindlichkeit des Interferometers für die eingestrahlte Ultraschallfrequenz maximal ist, das heißt, daß die Armlängendifferenz etwa gleich der Lichtgeschwindigkeit dividiert durch das Zweifache der mit dem Brechungsindex multiplizierten Ultraschallfrequenz ist.

In dem Differenzdemodulationsverstärker 72 ist die Differenz des Ausgangssignales der ersten Interferenzphotodiode 70 und der zweiten Interferenzphotodiode 73 bildbar, wobei dieses Differenzsignal durch die Frequenzverschiebung in der Bragg-Zelle 63 mit anschließender Demodulation von tieffrequenten Störungen entkoppelbar ist. Dadurch sind beispielsweise Intensitätsschwankungen in dem reflektierten Strahl 33 oder niederfrequente mechanische Störungen ausgleichbar. Das Differenzsignal ist weiterhin in dem Differenzdemodulationsverstärker 72 verstärkbar und beaufschlagt über die Leitung 42 den Zeitorintegrator 48 der Sende- und Empfangseinheit 19.

In einem abgewandelten Ausführungsbeispiel ist das Heterodyne-Laufzeit-Interferometer 58 durch ein aktiv stabilisiertes faseroptisches Laufzeit-Interferometer ersetzt. Das stabilisierte Interferometer weist in seinem langen Arm einen Phasenverschieber auf, der in einem Regelkreis über eine Leitung mit einem Differenzverstärker verbunden ist, so daß Änderungen der optischen Weglänge ausgleichbar sind. Die Ein- und Auskopplung erfolgt wie in dem in Fig. 3 dargestellten Ausführungsbeispiel mit dem Heterodyne-Laufzeit-Interferometer.

In Fig. 4 ist ein weiteres Ausführungsbeispiel der Erfindung dargestellt, bei dem die in Fig. 1 und Fig. 3 dargestellten entsprechenden Bauelemente mit den gleichen Bezugszeichen versehen und im folgenden nicht weiter erläutert sind. In dem Ausführungsbeispiel der Fig. 4 sind die Auslenkungen der Meßspitze 1 mittels einer kapazitiven Detektionsvorrichtung erfassbar. Die kapazitive Detektionsvorrichtung weist eine Meßkapazität auf, die durch die metallisch beschichtete Rückseite des Federbalkens 2 und eine nadelspitzenartige Gegenelektrode 77 gebildet ist, deren Spitze in Richtung des Federbalkens 2 ausgerichtet ist. Der Federbalken 2 ist an einer elektrisch leitenden Halterung 78 angebracht, die an eine Masse 79 angeschlossen ist.

Die Gegenelektrode 77 ist mechanisch an einem Piezoelement 80 angebracht und elektrisch von diesem entkoppelt. Das Piezoelement 80 ist an einem mechanischen Verschiebetisch 81 befestigt, der wiederum an der Haltevorrichtung 4 angebracht ist. Das Piezoelement 80 ist über eine Leitung 82 von einem regelbaren Netzgerät 83 mit Spannung beaufschlagbar. Die Gegenelektrode 77 ist grob über die mechanische Verstellung des Verschiebetisches 81 und fein über die Änderung der Versorgungsspannung des Piezoelementes 80 in einem Abstand über dem Federbalken 2 positionierbar.

Die Gegenelektrode 77 ist elektrisch über eine Leitung 84 mit einem Kapazitätsmeßkreis 85 verbunden. Die Meßkapazität ist in einem Schwingkreis des Kapazitätsmeßkreises 85 integriert, der durch einen bei etwa 915 Megahertz schwingenden Oszillator angeregt ist. Die Frequenz des Oszillators ist so gewählt, daß sie im steilsten Bereich der Flanke der Resonanzkurve des

Schwingkreises liegt. Änderungen der Meßkapazität durch Auslenkungen der Meßspitze 1 und damit des Federbalkens 2 führen zu einer Änderung der Resonanzfrequenz des Schwingkreises und damit der durch den Oszillator angeregten Amplitude. Diese Amplitudenänderungen sind über einen Tiefpaß 86 und einen Hochpaß 87 in einen niederfrequenten und einen hochfrequenten Anteil auftrennbar.

Der Tiefpaß 86 hat einen Durchlaßbereich bis etwa 20 Kilohertz, und der Hochpaß 87 hat einen Durchlaß ab etwa dem halben Wert der Ultraschallfrequenz. Somit sind die langsamen, durch Änderungen der Topographie der Oberfläche der Probe 11 auftretenden Auslenkungen der Meßspitze 1 an einem Niederfrequenzgang 88 und die hochfrequenten, ultraschallinduzierten Auslenkungen der Meßspitze 1 an einem Hochfrequenzgang 89 abgreifbar.

Das an dem Niederfrequenzgang 88 anliegende Signal ist über die Leitung 30 in den Analog-Digital-Wandler 31 einspeisbar und dient als Regelsignal zum Konstanthalten des mittleren Abstandes zwischen der Oberfläche der Probe 11 und der Meßspitze 1. Das an dem Hochfrequenzgang 89 anliegende Signal ist über die Leitung 42 in die Sende- und Empfangseinheit 19 einkoppelbar. Die weitere Datenverarbeitung erfolgt wie bei Fig. 1, 2 und 3 beschrieben.

#### Patentansprüche

1. Akustisches Mikroskop zum Untersuchen einer Probe (11) mit einer an einem Federbalken (2) angebrachten, im oberflächennahen Bereich einer Oberfläche der Probe (11) angeordneten Meßspitze (1), mit einem Ultraschallwandler, mit einer Bewegungsvorrichtung (6, 7, 8) zum Positionieren der Probe (11) bezüglich der Meßspitze (1), und mit einer Regel- und Meßdatenerfassungsvorrichtung (17), wobei

- a) der Ultraschallwandler ein von der Meßspitze (1) beabstandeter Sendekopf (9) ist, mit dem Ultraschall in die Probe (11) einkoppelbar ist,
- b) der Ultraschall eine Frequenz aufweist, die wenigstens eine Größenordnung höher als die Resonanzfrequenz des Federbalkens (2) mit der daran angebrachten Meßspitze (1) ist,
- c) der Federbalken (2) und die Bewegungsvorrichtung (6, 7, 8) mit dem Sendekopf (9) und der Probe (11) über eine Haltevorrichtung (4), die eine gegenüber der Frequenz des Ultraschalls niedrigere Resonanzfrequenz aufweist, mechanisch steif miteinander verbunden sind und
- d) eine den Federbalken (2) mit der Meßspitze (1) aufweisende Detektionsvorrichtung (1, 2, 36, 37, 39, 41; 1, 2, 24, 58; 1, 2, 77, 85 bis 87) vorgesehen ist, die die bezüglich der Frequenz des Ultraschalls niederfrequenten topographiebedingten Auslenkungen der Meßspitze (1) über ein erstes Detektionssignal und die durch den in die Probe (11) eingekoppelten Ultraschall hervorgerufenen hochfrequenten Auslenkungen der Meßspitze (1) über ein zweites Detektionssignal erfaßt, wobei das erste Detektionssignal einem Regelkreis (2, 8, 17, 24, 29; 2, 8, 17, 77, 85, 86) einspeisbar ist, mit dem der Abstand zwischen der Meßspitze (1) und der Oberfläche der, Probe (11) bei einer bezüglich der Frequenz des Ultraschalls niederfrequenten Positionierate der Meßspitze



- ze (1) über die ultraschallinduzierten hochfrequenten Auslenkungen der Meßspitze (1) zeitlich gemittelt konstant haltbar ist.
2. Akustisches Mikroskop nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Ultraschall durch einen Vorlaufkörper (10) in die Probe (11) einkoppelbar ist.
3. Akustisches Mikroskop nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß ein von dem Federbalken (2) reflektierter Lichtstrahl (22) über optische Umlenkvorrichtungen (23, 32) in die Detektionsvorrichtung (1, 2, 24, 36, 37, 39, 41; 2, 58) einkoppelbar ist, die eine im Regelkreis (2, 8, 17, 24, 29) vorgesehene erste optische Detektionseinheit (24, 29) zur Erzeugung des ersten Detektionssignales und eine zweite optische Detektionseinheit (38, 37, 39, 41; 58) zur Erzeugung des zweiten Detektionssignals aufweist.
4. Akustisches Mikroskop nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Detektionseinheit (24, 29) einen zweifach segmentierten lichtempfindlichen Detektor (24) und einen Normierungsverstärker (29) aufweist, wobei der Lichtstrahl (22) in der Mittelposition der Meßspitze (1) mittig auf den zweifach segmentierten Detektor (24) fällt und in der Mittelposition ein Neutralsignal an dem Ausgang des Normierungsverstärkers (29) anliegt, das aus der auf die Summe der Ausgangsspannungen der Elemente (25, 26) des segmentierten Detektors (24) normierten Differenz der Ausgangsspannungen gebildet ist.
5. Akustisches Mikroskop nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß die zweite Detektionseinheit (36, 37, 39, 41) einen einzelligen lichtempfindlichen Detektor (37) und eine Strahlabschattungsvorrichtung (36) aufweist, wobei die Strahlabschattungsvorrichtung (36) in Bezug auf den einzelligen lichtempfindlichen Detektor (37) so angeordnet ist, daß in der Mittelposition der Meßspitze (1) der auf den einzelligen Detektor (37) fallende Lichtstrahl (33) mittig abgeschattet ist.
6. Akustisches Mikroskop nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß die zweite Detektionseinheit (58) ein Heterodyne-Laufzeit-Interferometer (58) aufweist, in dessen langem Arm (60) eine Frequenzverschiebungsvorrichtung (63) zum Verschieben der Frequenz des in dem langen Arm (60) laufenden Lichtstrahles angeordnet ist.
7. Akustisches Mikroskop nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Interferenzstrahlen (68, 69) des Heterodyne-Laufzeit-Interferometers (58) jeweils einen lichtempfindlichen Detektor (70, 73) beaufschlagen, deren Ausgangssignale in einem Differenzdemodulationsverstärker (72) voneinander subtrahiert und von der Frequenz der Frequenzverschiebungsvorrichtung (63) demoduliert verstärkbar sind.
8. Akustisches Mikroskop nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Detektionsvorrichtung (1, 2, 77, 85 bis 87) eine durch den metallisch beschichteten Federbalken (2) und eine nadelartige Gegenelektrode (77) gebildete Meßkapazität aufweist.
9. Akustisches Mikroskop nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß mittels eines Kapazitätsmeßkreises (85) die Veränderungen in der Meßkapazität durch die Auslenkungen der Meßspitze (1) erfaßbar sind.

10. Akustisches Mikroskop nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß mittels eines Tiefpasses (86) und eines Hochpasses (87) die hochfrequenten, ultraschallinduzierten Auslenkungen der Meßspitze (1) von den niederfrequenten Ablenkungen aus dem Ausgangssignal des Kapazitätsmeßkreises (85) separierbar sind, wobei das Ausgangssignal des Tiefpasses (86) als Regelsignal für den Regelkreis (2, 8, 17, 77, 85, 86) dient.

11. Akustisches Mikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß mittels einer Sende- und Empfangseinheit (19) über eine Zeittorschaltung (48) in einem durch einen Impulsgenerator (49) und eine Verzögerungsschaltung (52) vorbestimmbaren Zeitbereich die mittlere ultraschallinduzierte Auslenkung der Meßspitze (1) nach Aussenden des Ultraschalles durch den Sendekopf (9) erfaßbar ist.

12. Akustisches Mikroskop nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Zeitbereich so eingestellt ist, daß der Mittelwert der ersten ultraschallinduzierten Auslenkung der Meßspitze (1) erfaßbar ist.

13. Akustisches Mikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß in der Regel- und Meßdatenerfassungsvorrichtung (17) die Meßdaten der Topographie der Probe (11) und einer der Auslenkung der Meßspitze (1) proportionalen Meßgröße in Abhängigkeit von der Position der Probe (11) abspeicherbar sind.

---

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

---

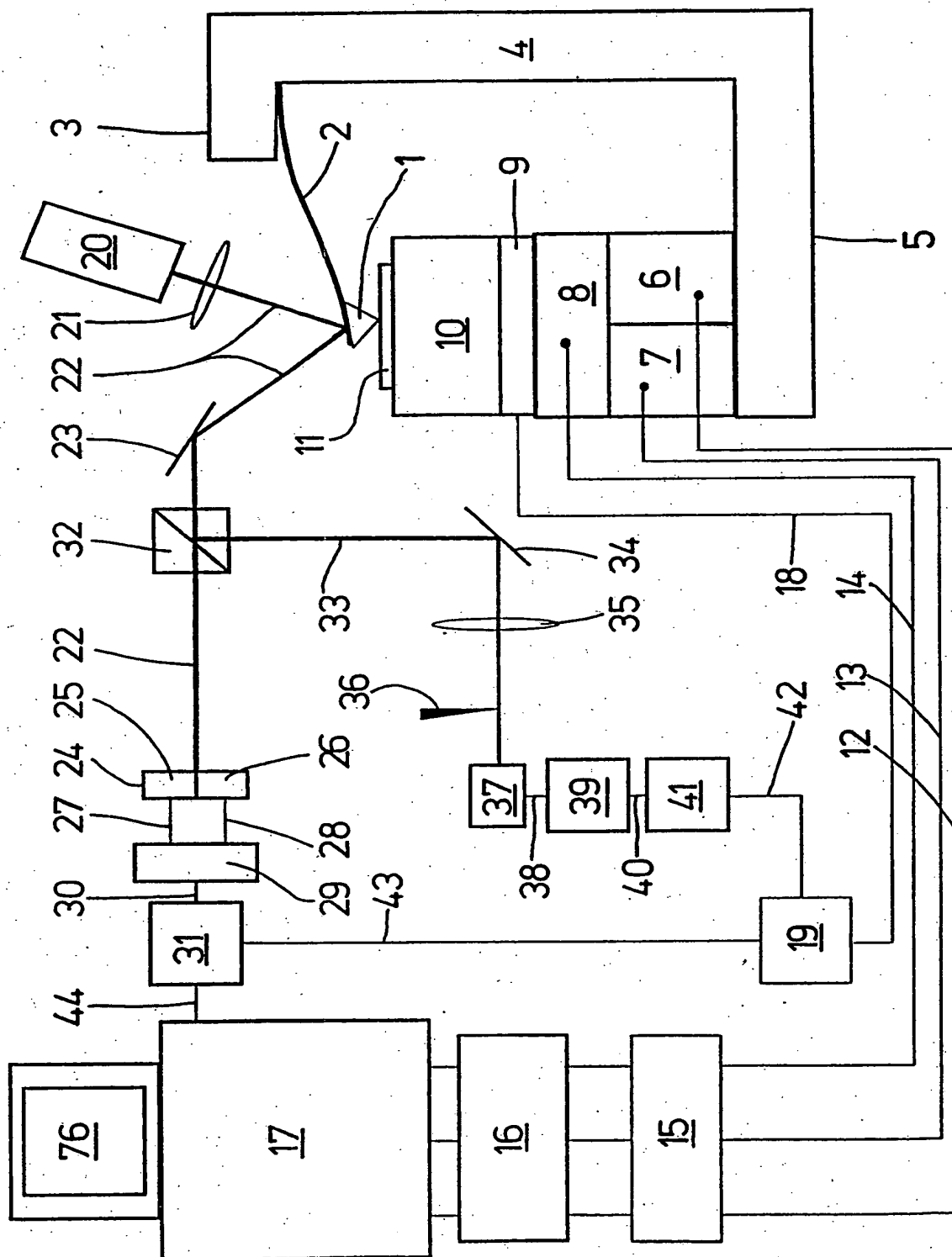


Fig. 1



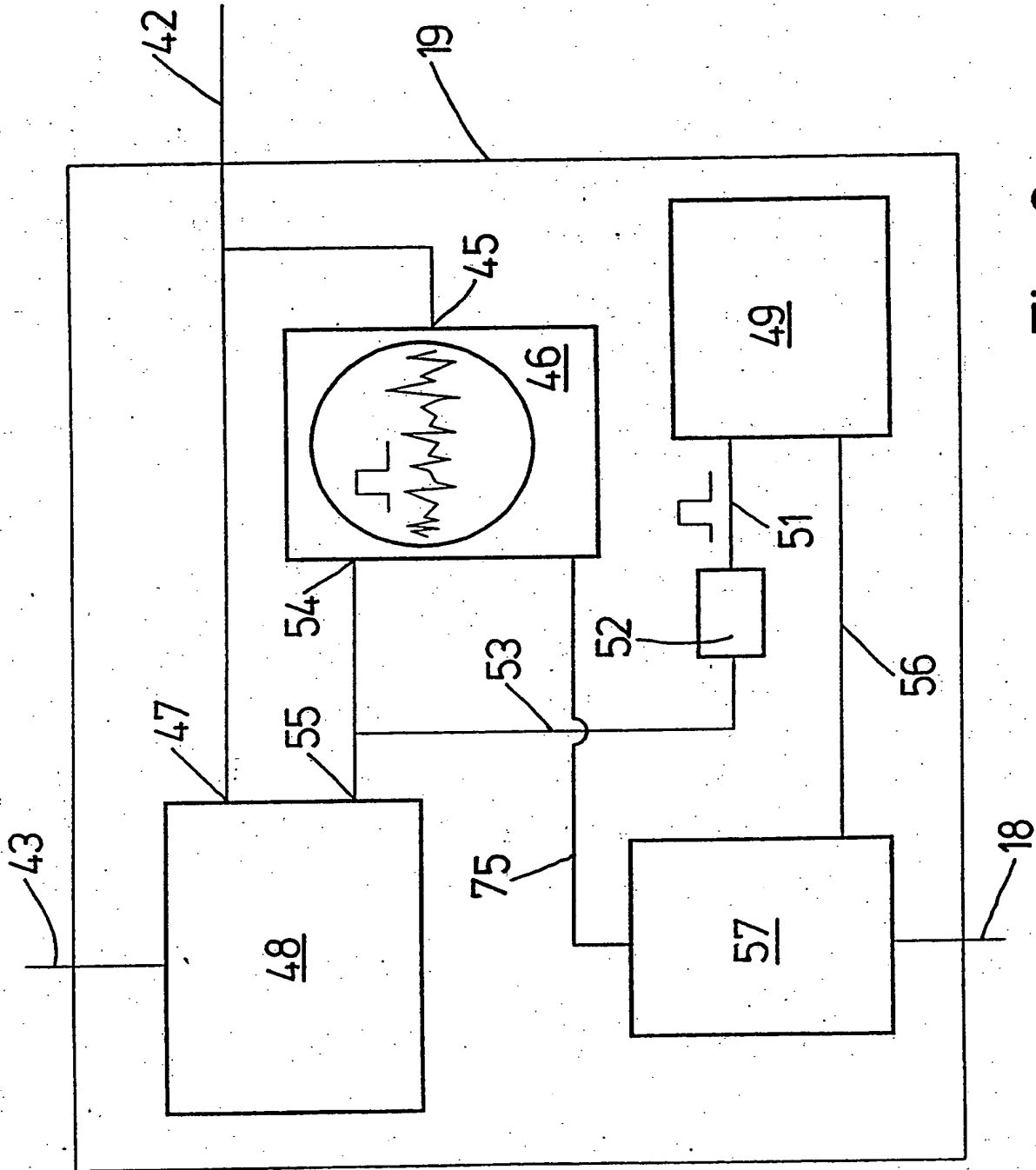


Fig. 2

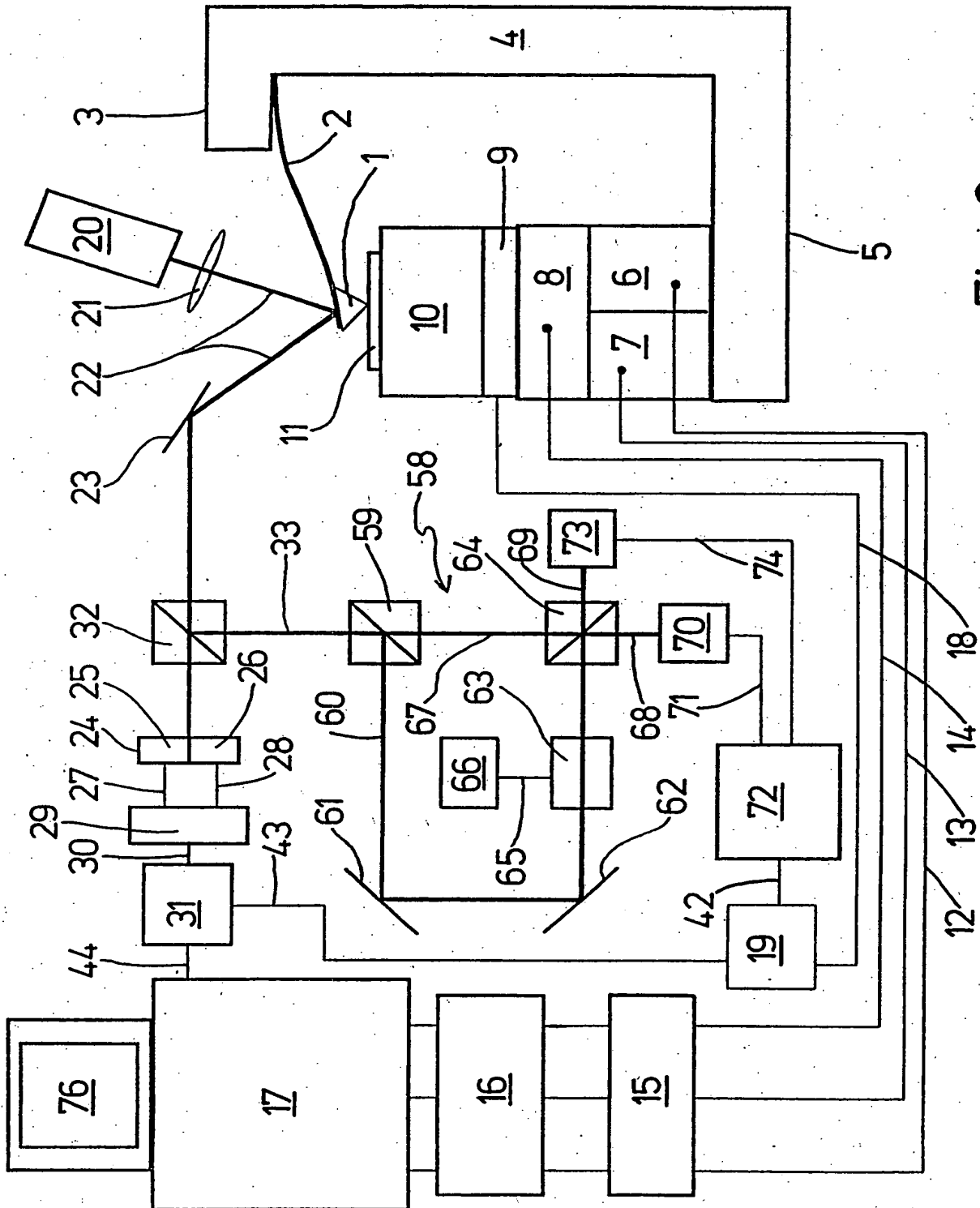
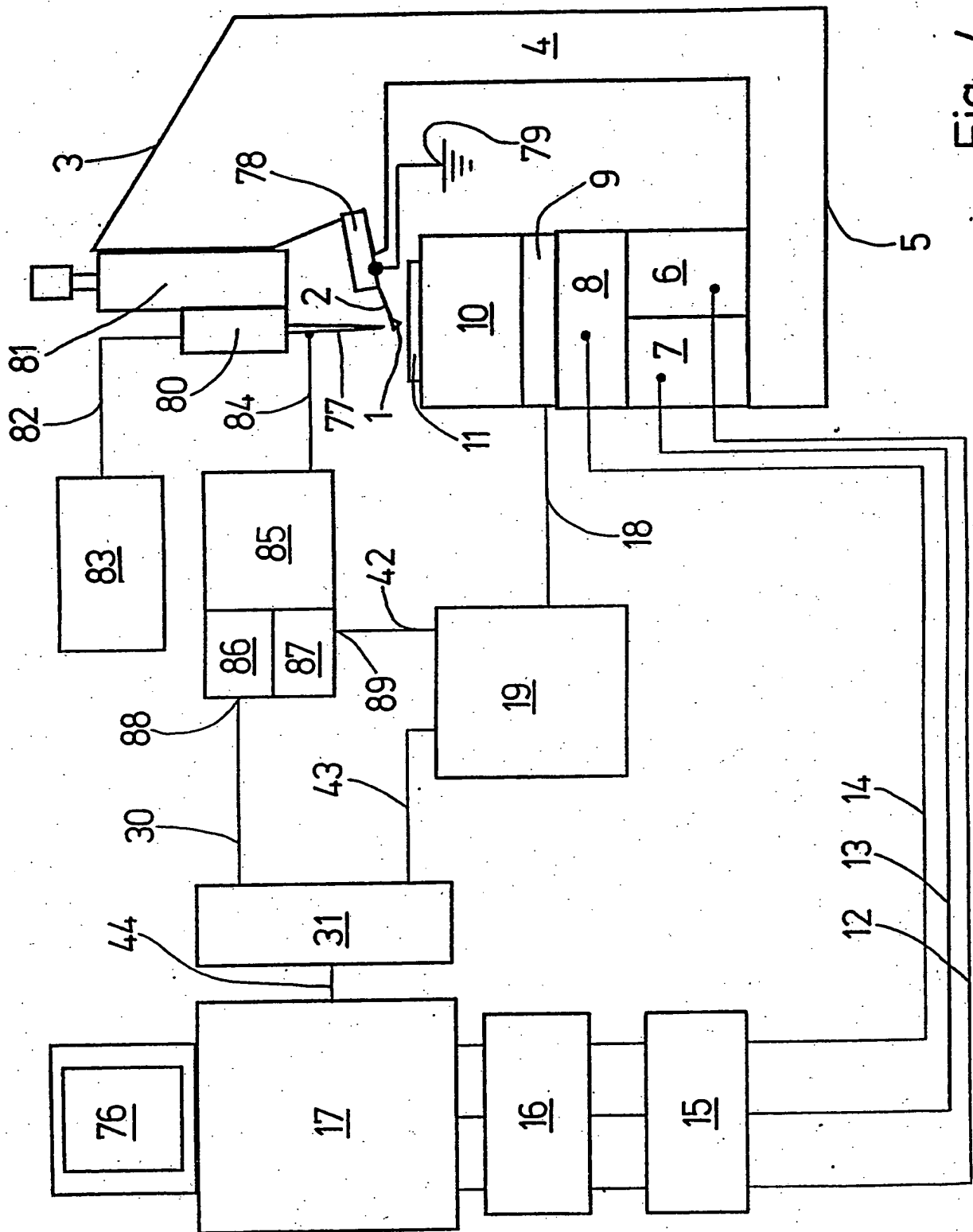


Fig. 3



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☒ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**